

Röntgensugárzás előállítása, spektruma, kölcsönhatása az anyaggal

Haluszka Dóra

2024. 11. 13.

haluszka.dora@semmelweis.hu

Röntgen és kora

1895: Röntgen felfedezi az ismeretlen "X" sugárzást

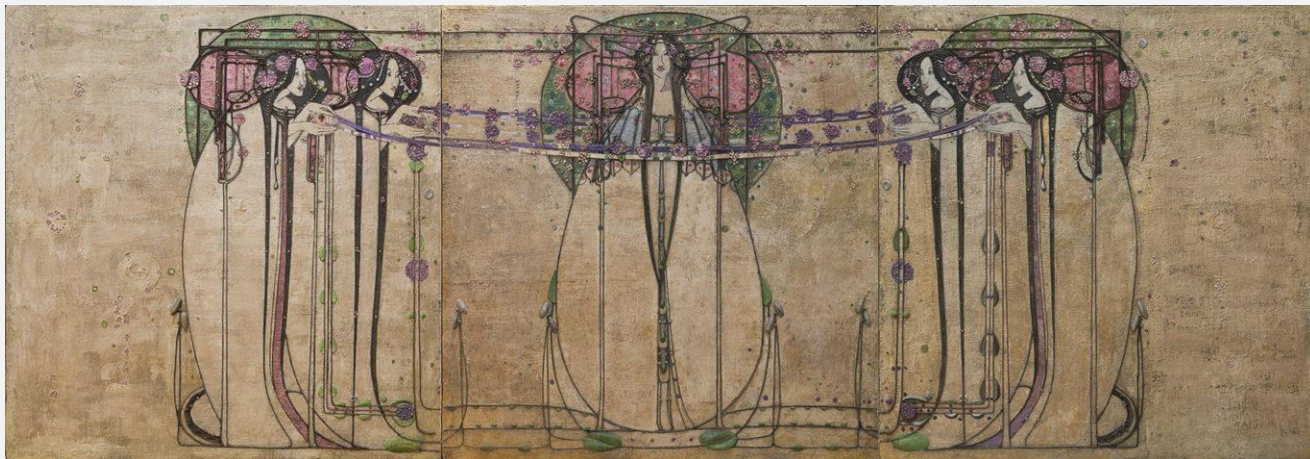
(Alfred Nobel végrendelete, mozgóképek, automobil...)

1896: Becquerel felfedezi a radioaktivitást

1897: Thomson felfedezi az elektront

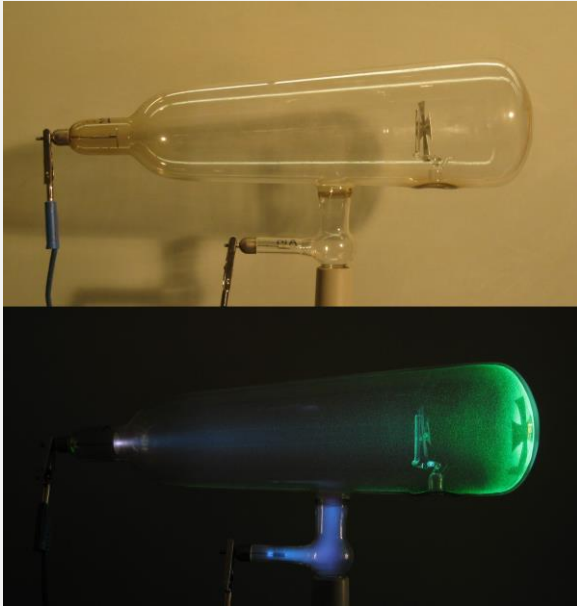
1898: Pierre és Marie Curie felfedezi a polóniumot és a rádiumot

1900: Max Planck dolgozata a hőmérsékleti sugárzásról...



Margaret and Frances MacDonald – Art Nouveau

a felfedezés



A Crookes-cső közelébe helyezett bárium platinocianid ernyő fluoreszkál.

- Röntgen fekete kartonba tekerte a csövet és vizsgálta a fluoreszkálást. November 8-án észrevette, hogy a Crookes-csővel egy vonalban lévő asztal alsó fiókjában a becsomagolt fotólemez megfeketedett úgy, hogy a felső fiókban lévő kulcs képét mutatta! Ezután szisztematikusan vizsgálta az ismeretlen sugárzást, megállapította, hogy a sugárzás áthatol fán, papíron, ruhán, sőt több fémen is, kivéve a nagyobb sűrűségű fémeket, pl. az ólmot.
- 1895. december 28-án „Egy újfajta sugárzásról: előzetes közlemény” címmel eredményeit beküldte a wüzburgi Fizikai-Orvosi Folyóirathoz.



Wilhelm Conrad Röntgen

1901: Fizikai Nobel-Díj
a röntgensugárzás felfedezéséért

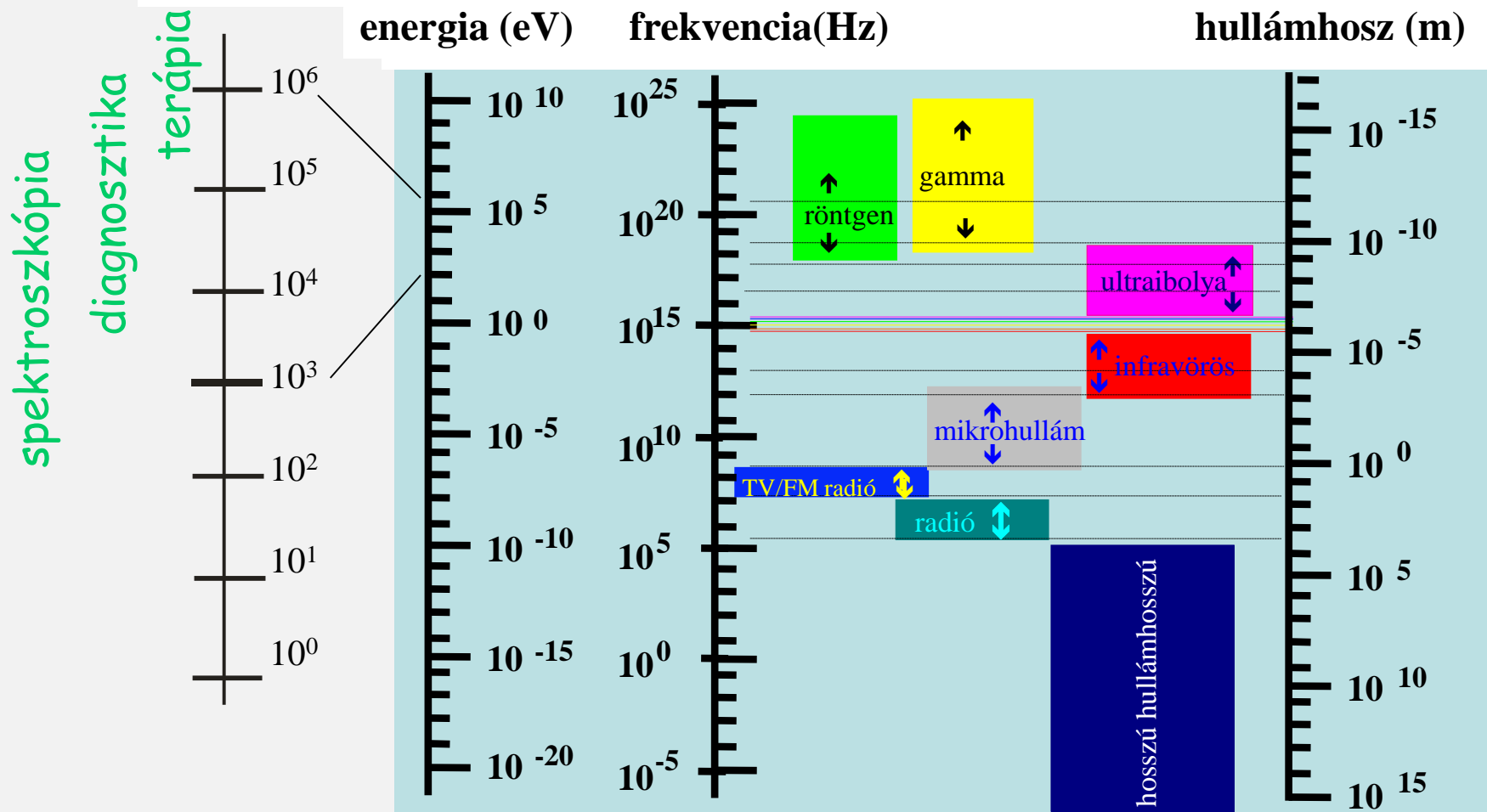
Felfedezés – 1895. november
Publikálás – 1895. december 28.
(1896-ban ezer fölötti publikáció...
Orvosi alkalmazás – 1896. január
- Edison 1896 májusra kifejleszti
a fluoroszkópot...



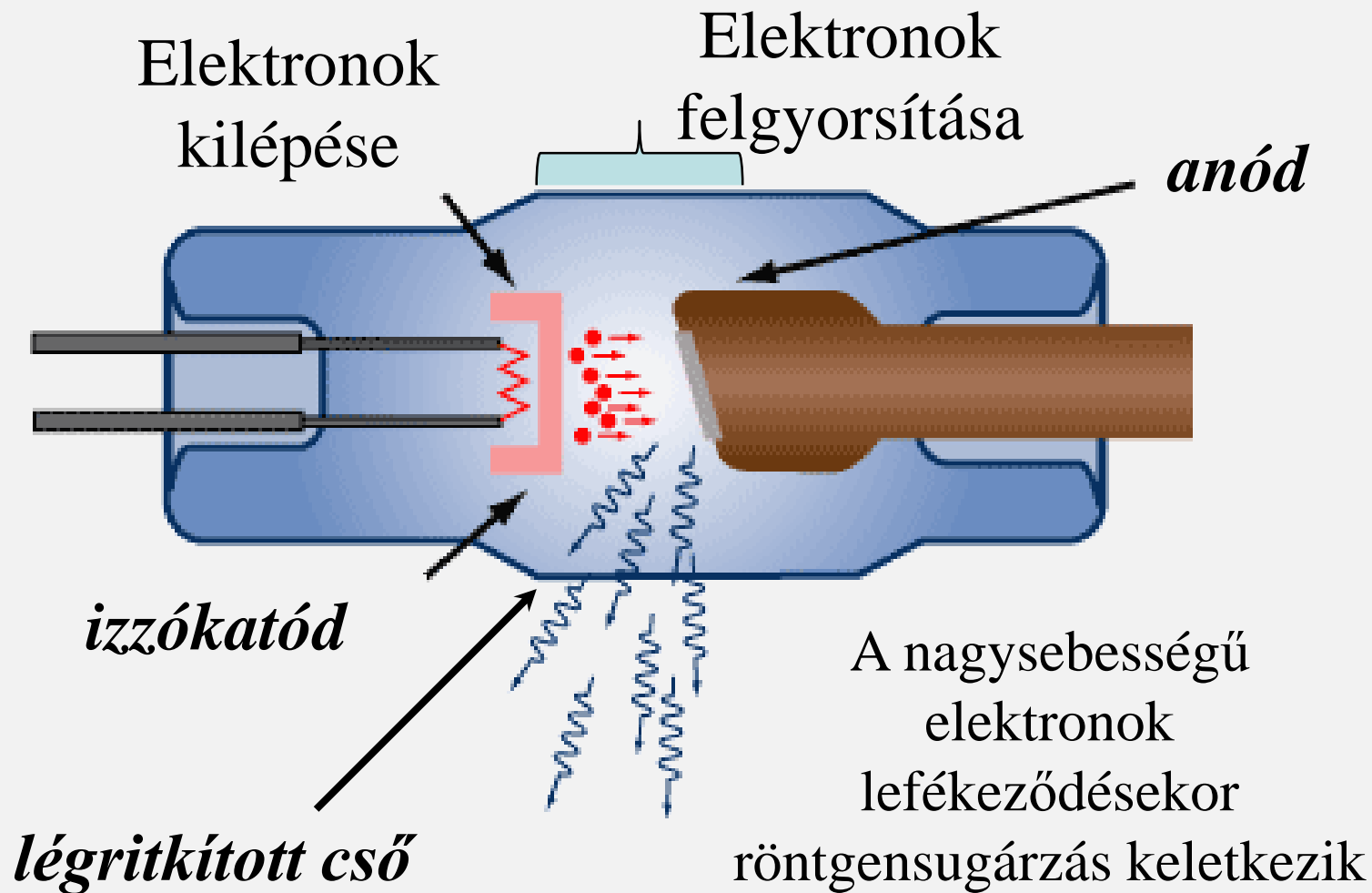
1895. december 22.: felvétel
Röntgen feleségének kezéről

A röntgensugárzás

elektromágneses sugárzás

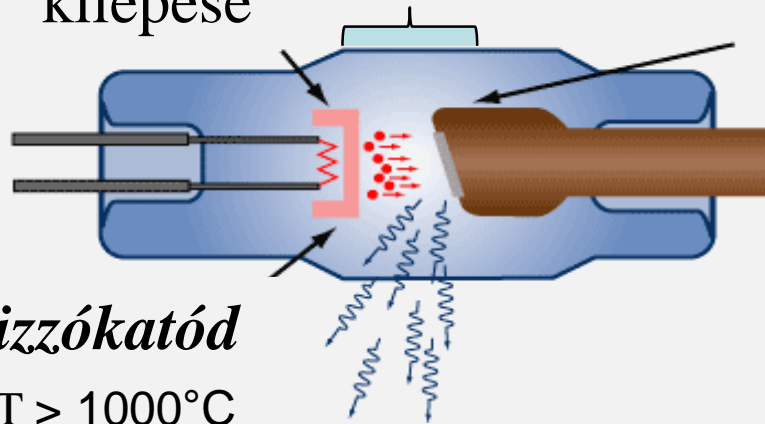


A röntgenső felépítése



A röntgencső működése

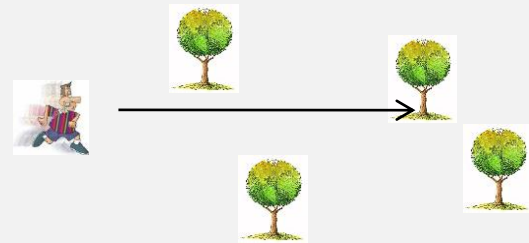
Elektronok
kilépése



izzókatód

$T > 1000^\circ\text{C}$

miért kell vákuum?

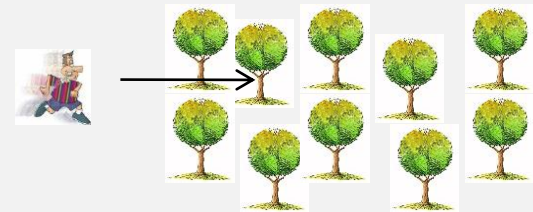


vákuum $\sim 10^{-4}$ Pa

szabad úthossz ~ 10 cm

$$I_{anod} = \frac{Q}{t} = \frac{n * e}{t}$$

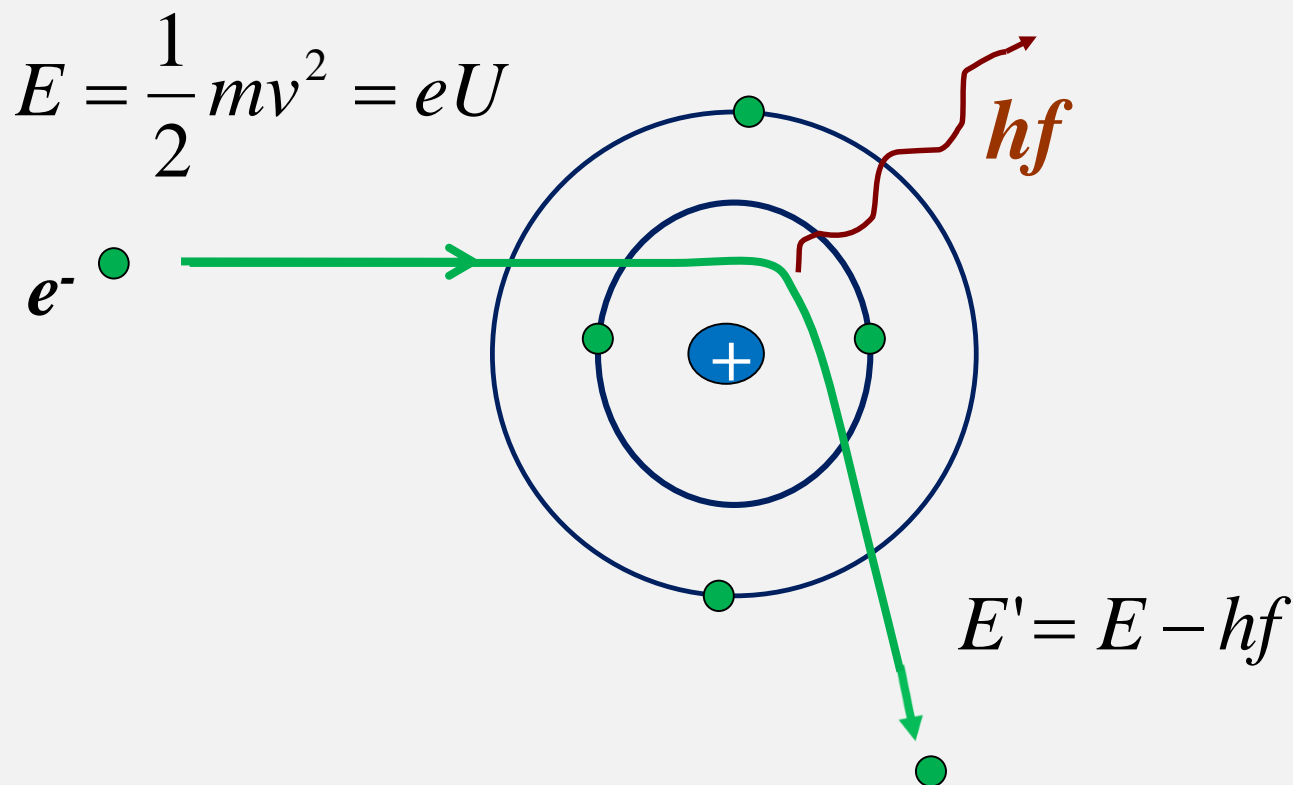
$$P_{elektromos} = UI$$



levegőben normál nyomáson
a szabad úthossz ~ 70 nm

A röntgensugárzás keletkezésének mechanizmusa

1. Fékezési sugárzás



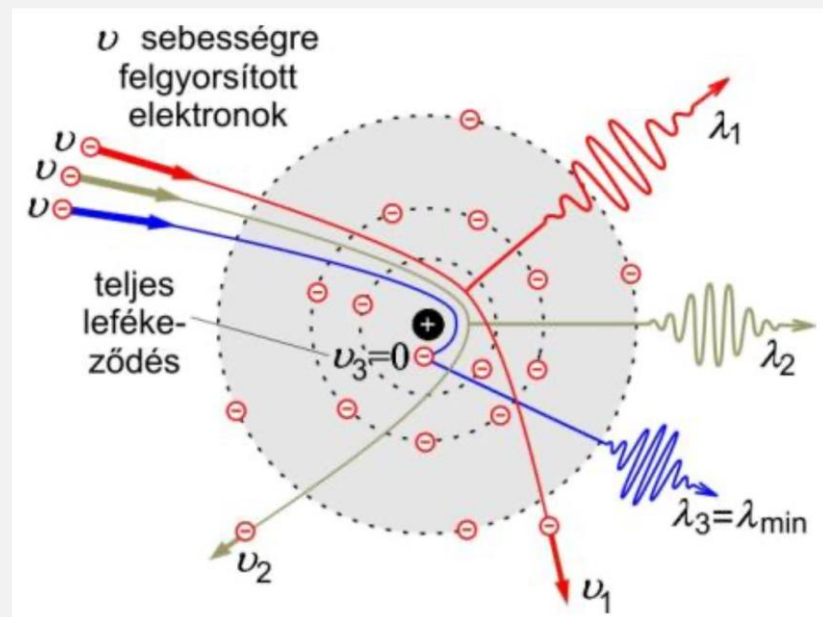
A belépő elektron eltérül és lelassul a mag erőterében.

Az eltérülő elektron mozgási energiája csökken.

Az energiakülönbséggel azonos energiájú foton keletkezik.

A foton energiája függ a

- a beérkező elektron energiájától
- az eltérülő elektron pályájától
- a target (anód) rendszámától



A maximális fotonenergia a belépő elektron mozgási energiájával egyenlő – **Duane-Hunt szabály**

A fékezési sugárzás spektruma

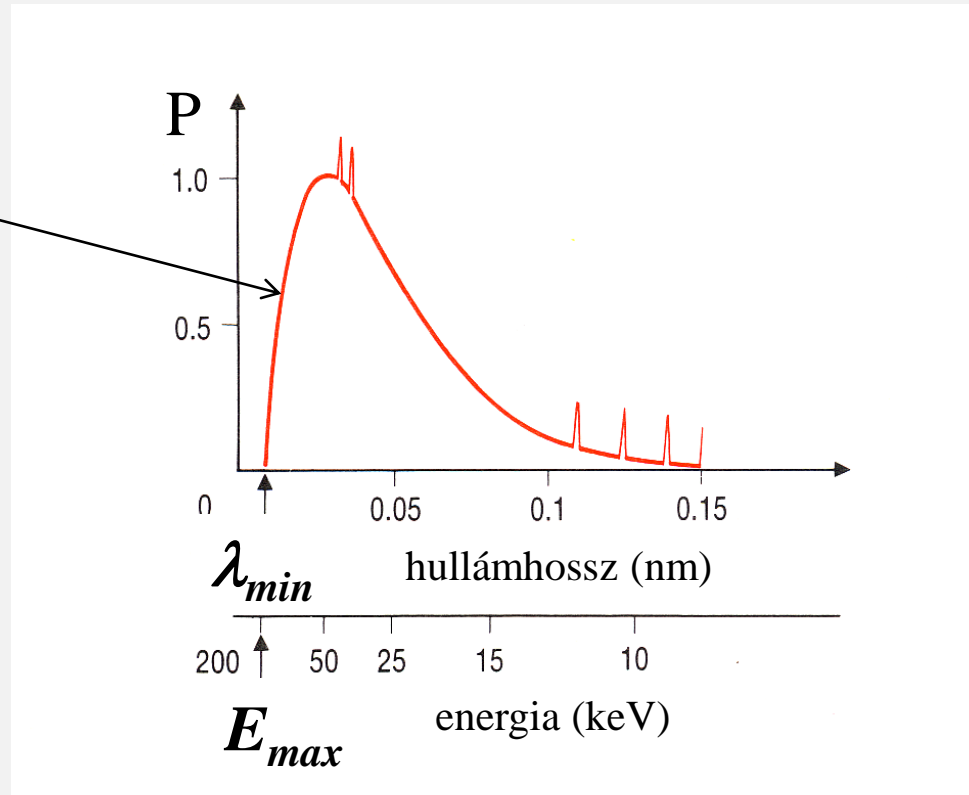
folytonos
spektrum

$$E_{\max} = \frac{1}{2}mv^2 = eU$$

$$eU = h \frac{c}{\lambda_{\min}}$$

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eU}$$

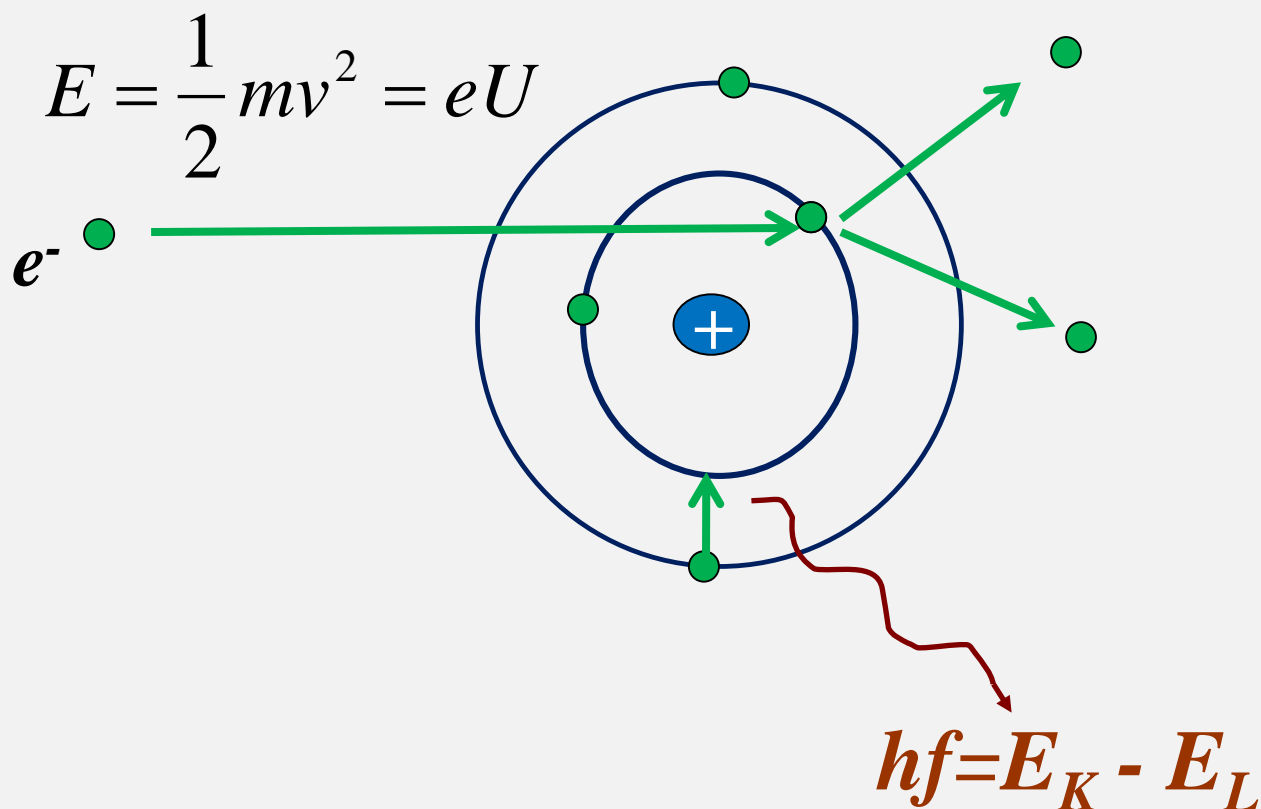
Duane-Hunt szabály



határhullámhossz (λ_{\min}) a veszteségmentes energiaátalakuláshoz tartozik, amikor az elektron teljes eU energiájából egy $h f_{\max}$ energiájú röntgenfoton keletkezik

A röntgensugárzás keletkezésének mechanizmusa

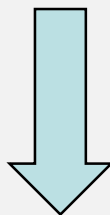
2. Karakterisztikus sugárzás



A belépő elektron – ha energiája elég nagy – belső héjon lévő elektront gerjeszthet/ionizálhat.

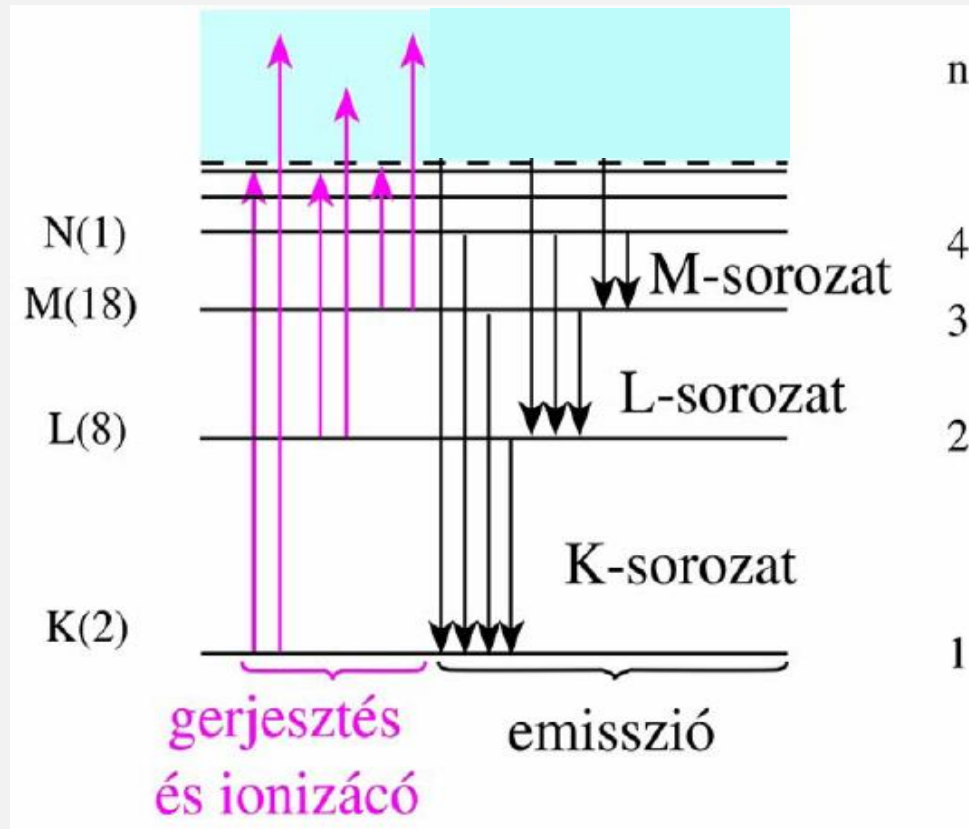
A távozó elektron helyén “lyuk” marad.

Az energia-minimum eléréséhez a betöltetlen állapotot egy magtól távolabbi elektron tölti be.



A héjak közötti energiakülönbséggel azonos energiájú foton keletkezik.

Lehetséges energiaátmenetek

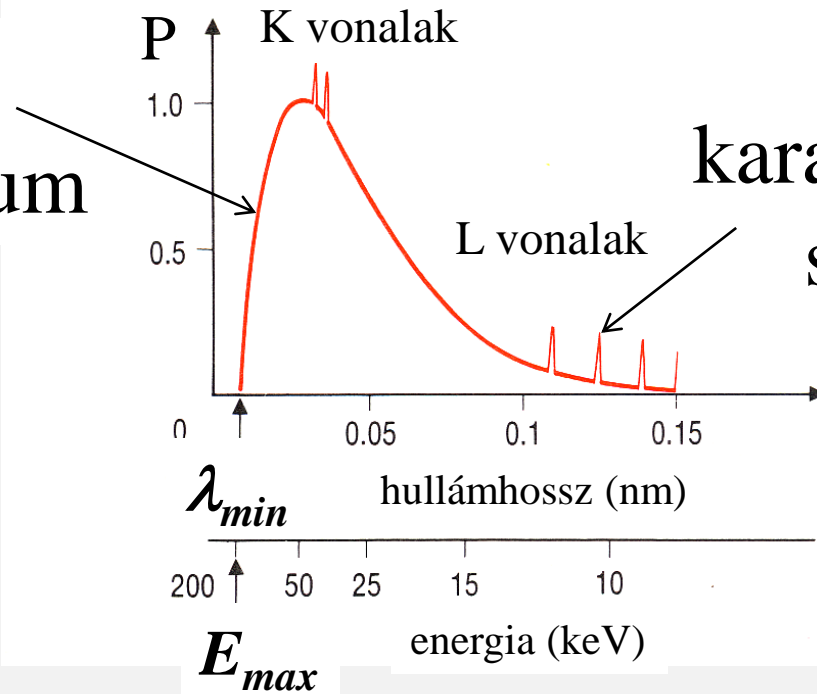


A lehetséges fotonenergiák a target elektronszerkezetétől függenek – karakterisztikus az adott anyagra

A röntgensugárzás spektruma

Folytonos
fékezési spektrum

Vonalas
karakterisztikus
spektrum



$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eU}$$

Duane-Hunt szabály

A röntgenső teljesítménye és hatásfoka

$$P = cIU^2Z$$

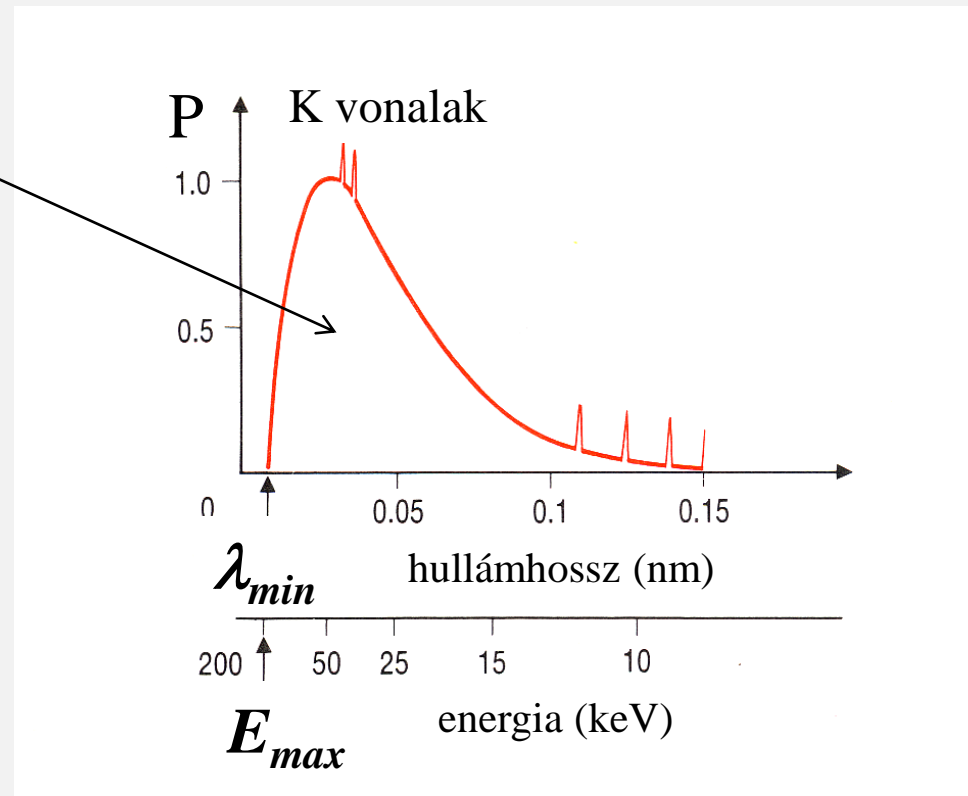
$$c = 1,1 \times 10^{-9} [1/V]$$

bemeneti teljesítmény:

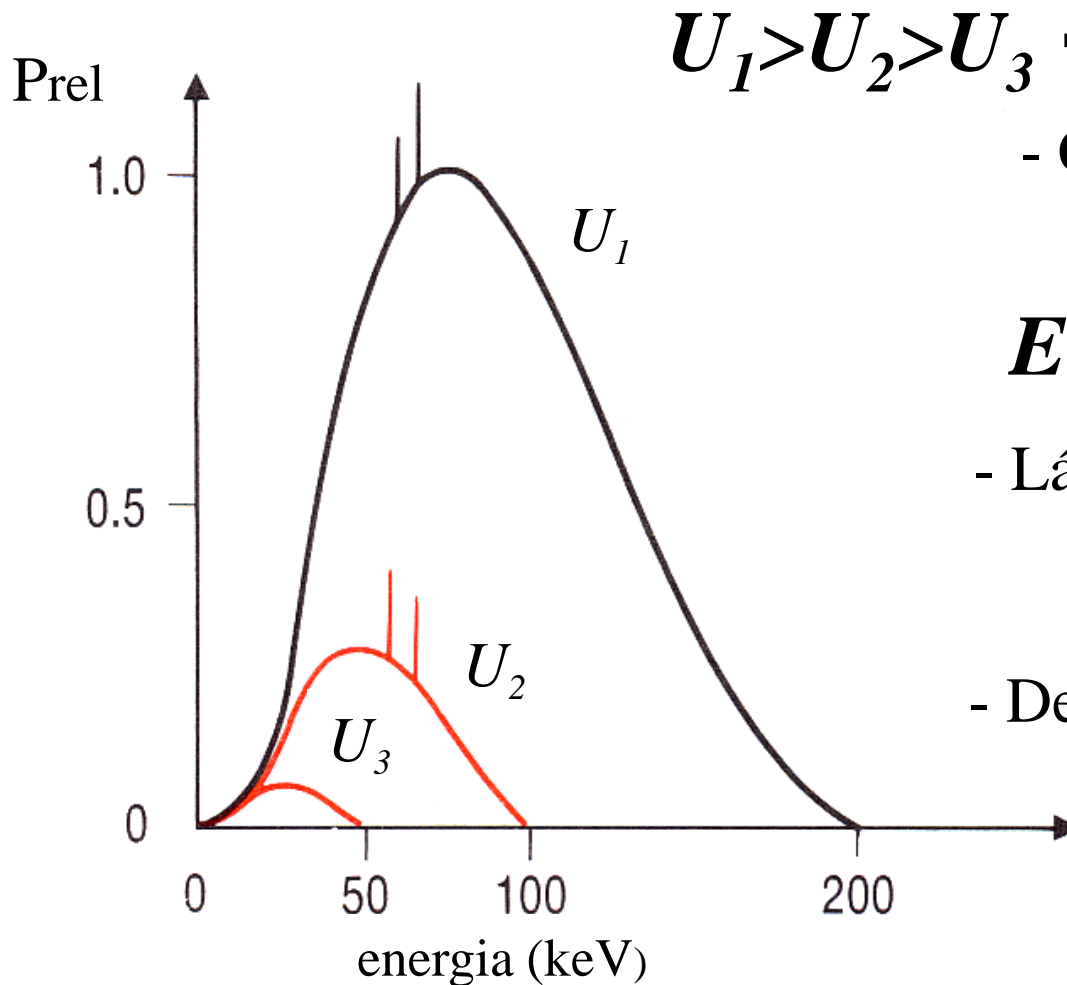
$$P' = IU$$

$$\eta = \frac{P}{P'} = cUZ$$

$$\eta < 1\%$$



ha csökken a gyorsítófeszültség



$$U_1 > U_2 > U_3 \rightarrow P_1 > P_2 > P_3$$

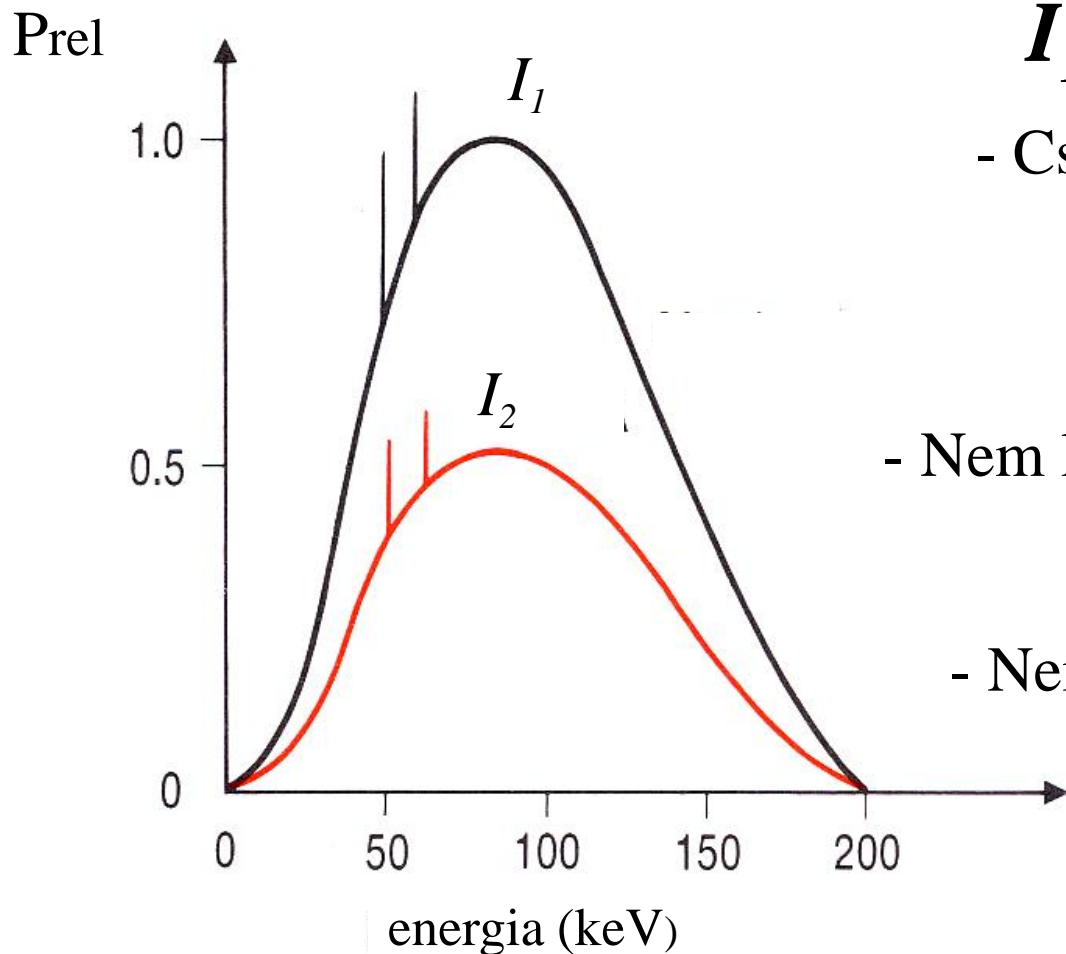
- Csökken a teljesítmény

$$E_{\max 1} > E_{\max 2} > E_{\max 3}$$

- Lágyul a fékezési sugárzás

- De nem változik a
karakterisztikus
vonalak helye!

ha csökken az anódáram erőssége



$$I_1 > I_2 \rightarrow P_1 > P_2$$

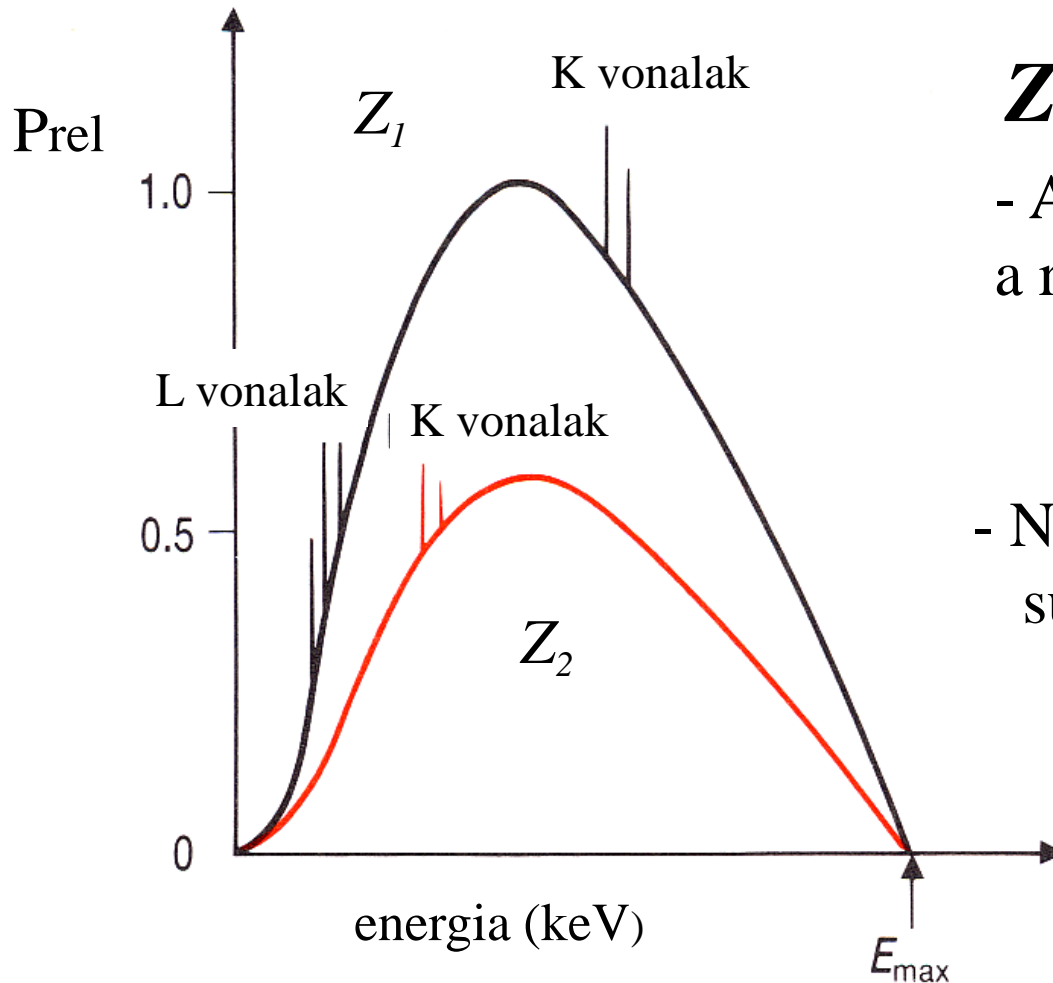
- Csökken a teljesítmény

$$E_{\max 1} = E_{\max 2}$$

- Nem lágyul a fékezési sugárzás

- Nem változik a
karakterisztikus
vonalak helye

ha változik az anód anyaga:



$$Z_1 > Z_2 \rightarrow P_1 > P_2$$

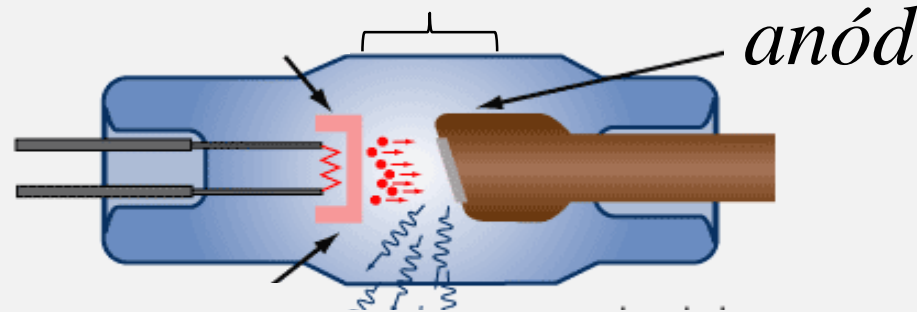
- A teljesítmény arányos a rendszámmal

$$E_{max1} = E_{max2}$$

- Nem változik a fékezési sugárzás keménysége

- De változik a karakterisztikus vonalak helye!

Röntgencső az orvosi gyakorlatban



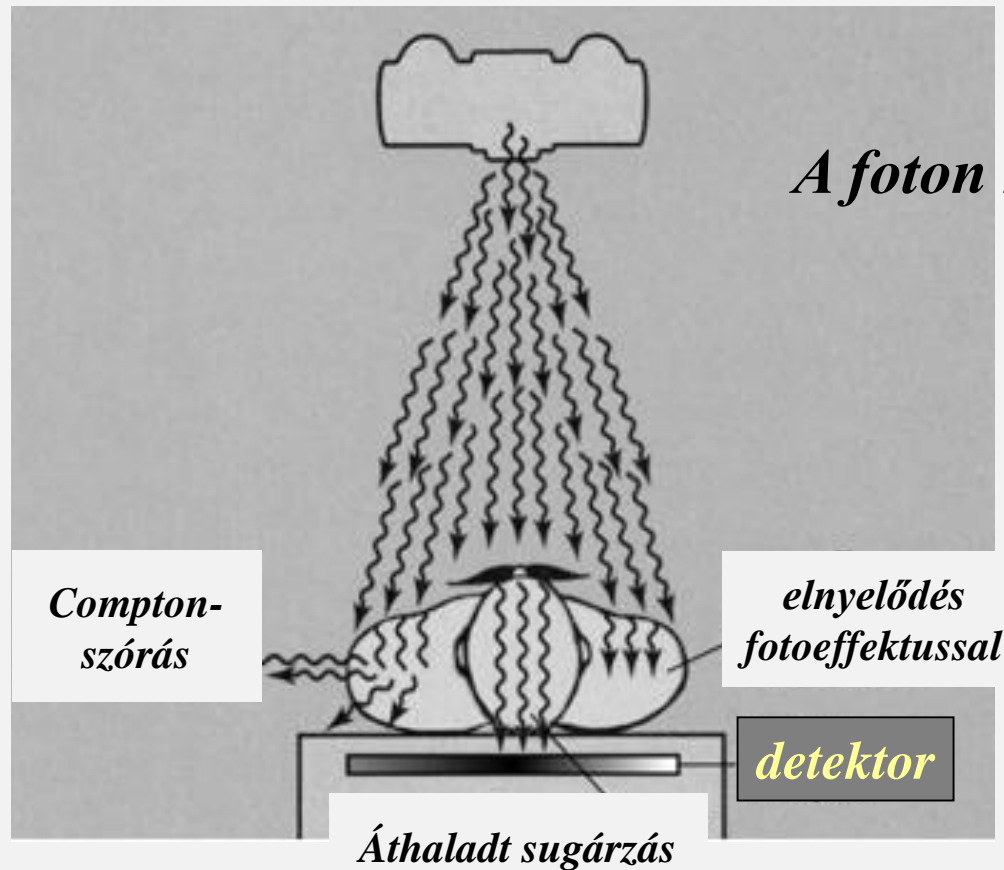
Az anód *anyaga*: - minél nagyobb rendszám
- minél magasabb olvadáspont

Az anód *fókusza* (az elektronok becsapódásának helye)
- kis fókuszs → élesebb kép
- nagy fókuszs → jobb hőeloszlás

Az anód *helyzete*: - álló - terhelhetőség: néhány W/mm^2
(fogászati gyakorlatban elég)
- forgó - egyenletesebb hőeloszlás, terhelhetőség:
 $10000 \text{ W}/\text{mm}^2$

Gyorsítófeszültség: 25-200 kV, anódáram: 1-1000 mA,
anód anyaga: W (mammográfiában Mo)

A röntgendiagnosztika alapja: a sugárzás elnyelődése



A foton kölcsönhatásának lehetőségei:

fotoeffektus

Compton szórás

párkeltés

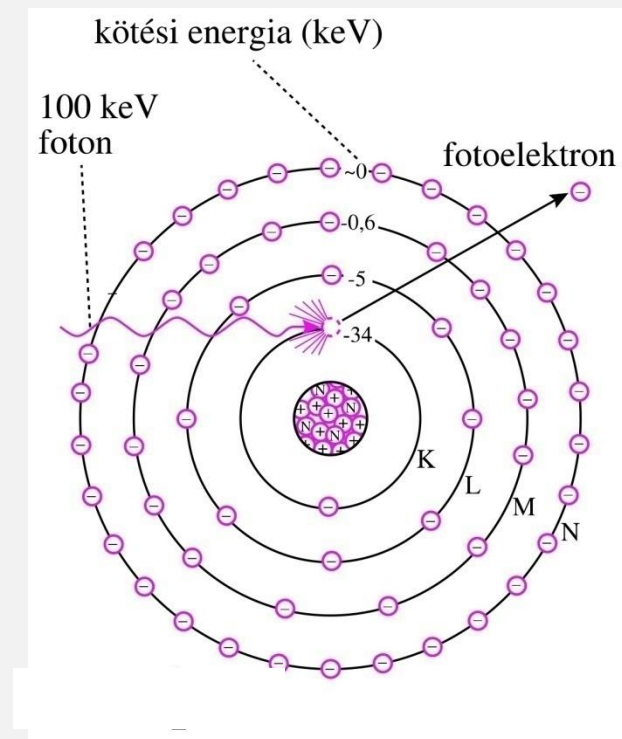
rugalmas szórás

(nincs energiaváltozás)

A kölcsönhatás mechanizmusa

Fotoeffektus

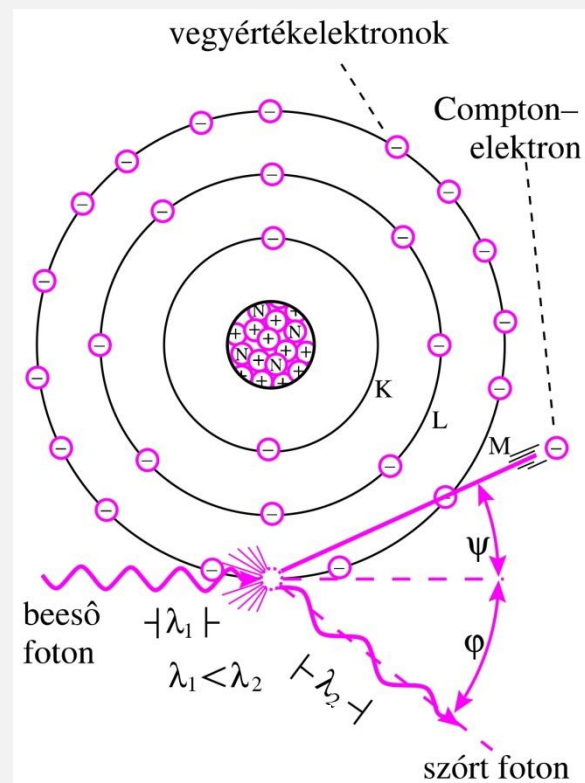
$$hf = E_{\text{köt}} + \frac{1}{2}m_e v^2$$



A kölcsönhatás mechanizmusa

Compton-szórás

$$hf = E_{\text{köt}} + \frac{1}{2} m_e v^2 + hf'$$



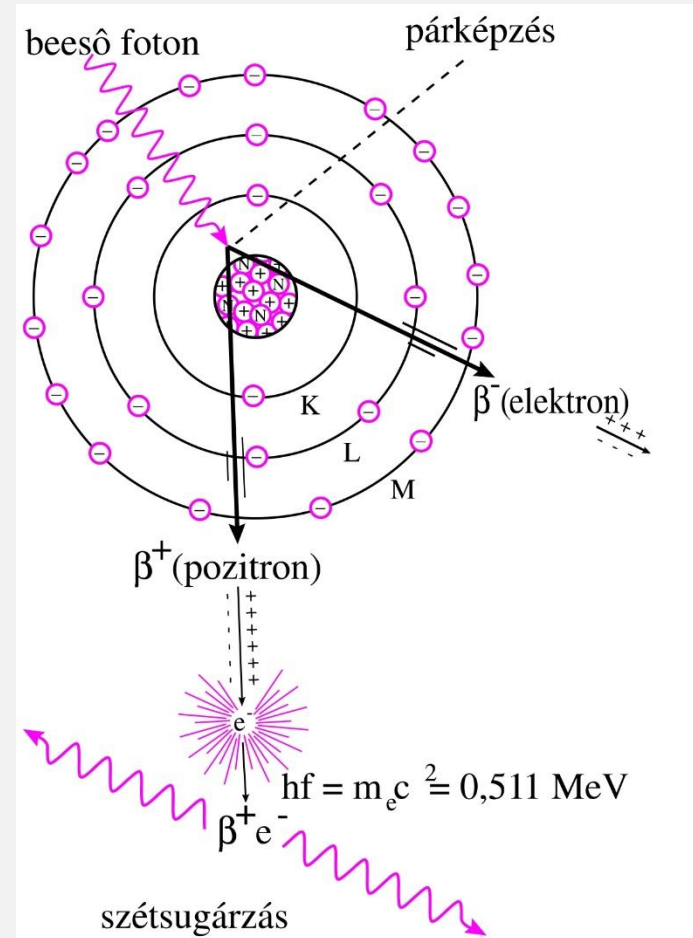
A kölcsönhatás mechanizmusa

Pároképzés

$$hf = 2m_e c^2 + 2\frac{1}{2}m_e v^2$$

$$hf \geq 2m_e c^2$$

$$hf \geq 1.02 \text{ MeV}$$



A röntgensugárzás kölcsönhatása az anyaggal

Intenzitás gyengülésének törvénye: $J = J_0 e^{-\mu x}$

μ függ az abszorbens sűrűségétől !
viszont μ és a sűrűség aránya állandó

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$$

μ_m [cm²/g] : tömeggyengítési állandó

Függ – a foton energiájától
– az abszorbens rendszámától

Intenzitás gyengülésének törvénye a tömeggyengítési állandóval:

$$J = J_0 e^{-\mu_m x_m}$$

$$x_m = \rho x \quad \mu_m = \frac{\mu}{\rho}$$

x_m [g/cm²]: felületi sűrűség

$$\left. \begin{array}{l} \mu = \frac{0.693}{D} \\ D_m = \rho D \end{array} \right\} \quad \boxed{\mu_m = \frac{0.693}{D_m}}$$

A részfolyamatok (abszolút és relatív) valószínűsége függ

- a foton energiájától
- az abszorbens rendszámától

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa$$

fotoeffektus Compton-szórás párképzés

$$\mu_m = \tau_m + \sigma_m + \kappa_m$$

	rendszámfüggés	energiafüggés
fotoeffektus	$\tau_m \sim Z^3$	$\tau_m \sim 1/E^3$
Compton-szórás	\sim független	enyhén csökkenő

Szűrők alkalmazása

A sugárzás tulajdonságainak (spektrum, térbeli eloszlás) módosítása

A felépítésből
adódó **szerkezeti elemek** szűrő
hatása.

Pl. az anód anyaga, röntgencső
fala, sugárkapu, stb.

A sugár útjába helyezett
külső szűrő,
általában Al vagy Cu lemezek.

Ezek segítségével szabályozhatunk.

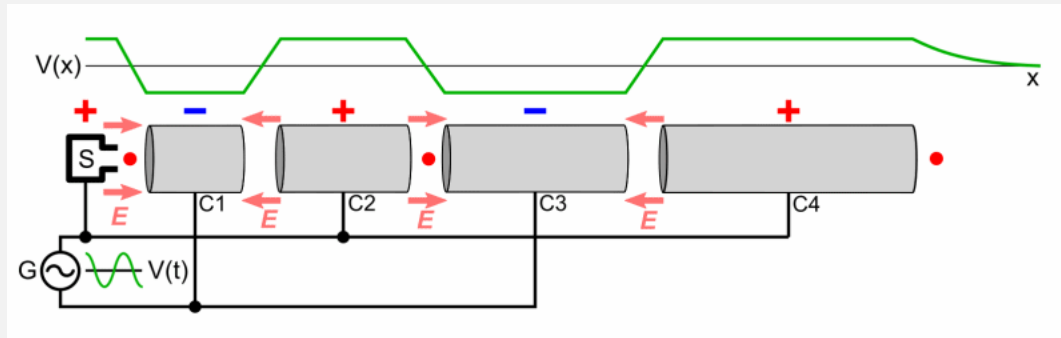
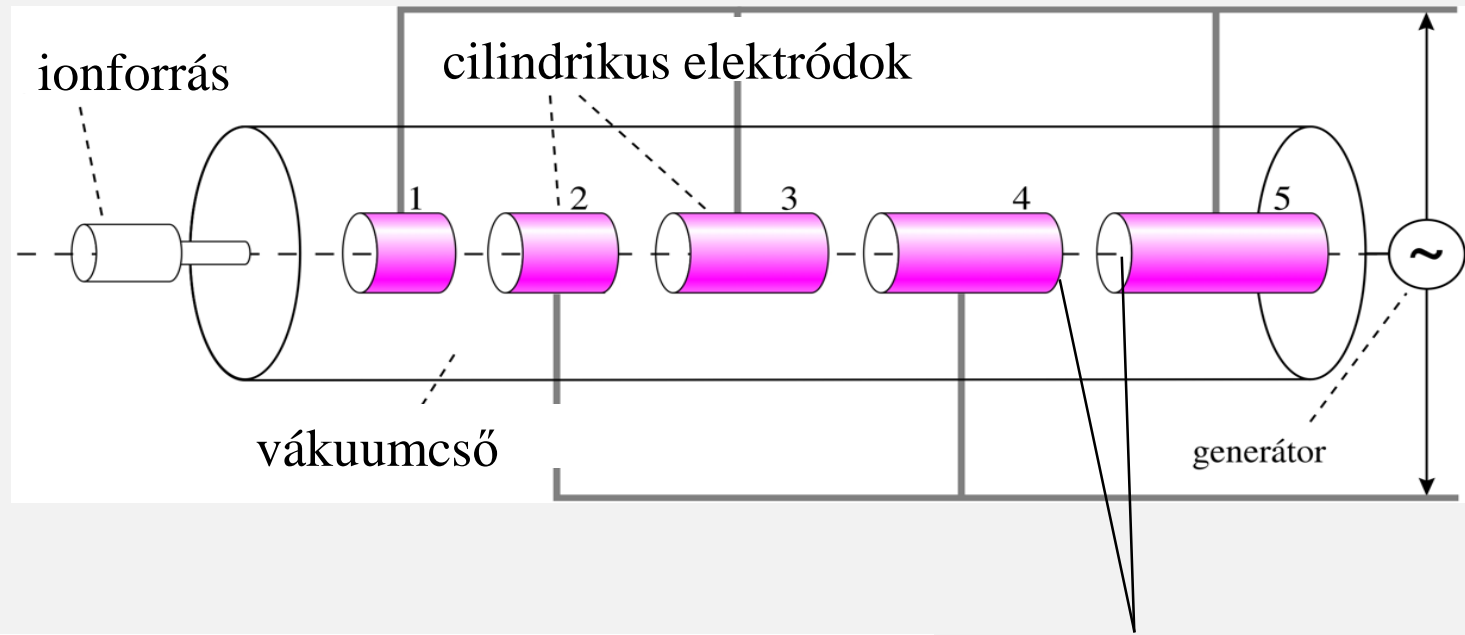
Hátránya: csökkenti az intenzitást
növeli a felvétel idejét

Előnye: kb 80%-kal csökkentheti a paciens sugárterhelését

A röntgensugárzás előállításának
speciális módszerei:

részecskegyorsítók

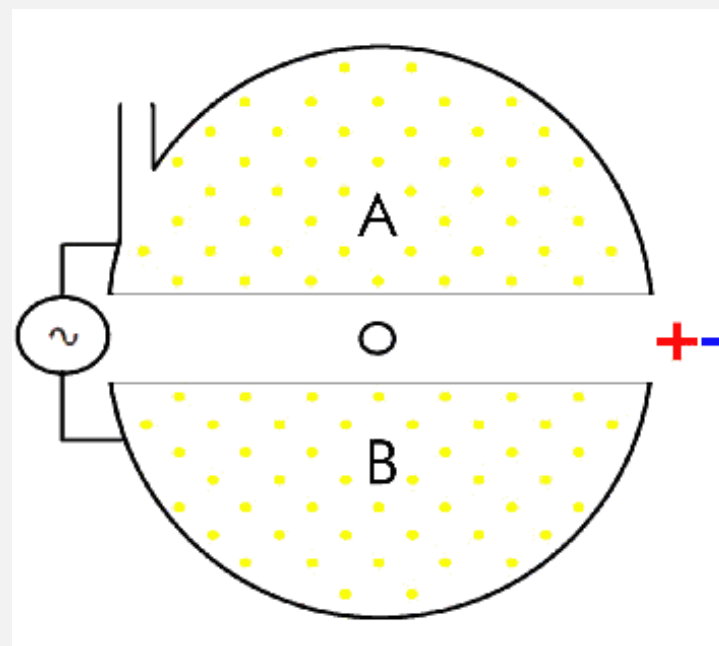
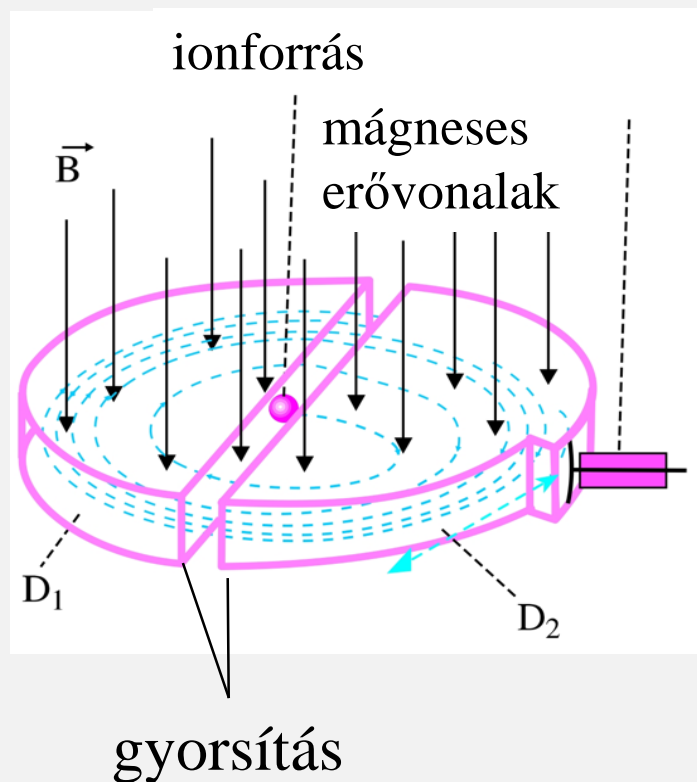
Lineáris gyorsítók



gyorsítás

Alkalmazás:
sugárterápia
(4-25 MeV)

Ciklotron



mágneses tér (Lorenz-erő) \rightarrow körpálya
elektromos tér \rightarrow gyorsulás; pálya sugara nő
orvosi alkalmazás: elsősorban PET izotópok előállítása

Ellenőrző kérdések

A röntgenső felépítése

A röntgenső paraméterei

A fékezési sugárzás keletkezése és spektruma

A határhullámhossz oka, kiszámítása

A karakterisztikus sugárzás keletkezése és spektruma

A röntgensugárzás spektrumát befolyásoló paraméterek

Külső szűrők használata, hatása a kilépő röntgensugárzásra

Kapcsolódó fejezetek:

Damjanovich, Fidy, Szöllősi: Orvosi Biofizika

II. 3.1

3.1.1

3.1.2

3.1.3

3.1.4

3.1.5

3.1.6